

# 非金属矿产与非金属矿物材料在双碳战略中的作用

彭同江<sup>1,2,3</sup>, 孙红娟<sup>2,3</sup>, 丁文金<sup>2,3</sup>, 罗利明<sup>2,4</sup>, 刘波<sup>2,3</sup>

1. 西南科技大学 分析测试中心, 四川 绵阳 621010;
2. 西南科技大学 矿物材料及应用研究所, 四川 绵阳 621010;
3. 西南科技大学 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;
4. 西南科技大学 核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川 绵阳 621010

中图分类号: TD985 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)04-0001-10

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.04.001

**摘要** 基于非金属矿产(物)的理化属性及非金属矿物材料的加工和使役过程对于节能降碳作用的功能属性,重点从非金属矿产(物)的自然产出属性、助熔属性及非金属矿产(物)和矿物材料的保温绝热属性、胶凝属性、催化与载体属性、应用代替属性及新型矿物材料研发六个方面阐述了节能降碳原理及在双碳战略中的作用;提出在双碳战略思想指导下,要建立非金属矿产(物)与非金属矿物材料自身的节能降耗理论、技术体系、基于非金属矿物理化属性和可加工属性的找矿评价技术标准与规范,加强非金属矿产(物)的深度加工技术特别是高纯化技术研究,及在非金属材料保温绝热材料、助熔材料、胶凝材料、催化剂与载体材料和新型能源矿物材料方面进行重点规划与突破等关键问题。非金属矿产(物)与非金属矿物材料在节能降碳技术领域具有重要的作用,可为实现“双碳”目标做出重大贡献。

**关键词** 非金属矿产;理化属性;节能降碳;双碳战略

## 1 引言

2020年,国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论时发表重要讲话,指出“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”<sup>[1]</sup>。实现碳达峰、碳中和是我国向世界作出的庄严承诺,是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。随后,在党的十九届五中全会、中央经济工作会议、全国两会以及中央财经委员会第九次会议等一系列重要会议上,党中央对碳达峰碳中和工作作出部署,要求抓紧制订2030年前碳排放达峰行动方案,支持有条件的地方率先达峰;加快调整优化产业结构、能源结构,推动煤炭消费尽早达峰,大力发展新能源等。碳达峰碳中和是我国经济和社会可持续发展重大战略决策之一。

实现碳达峰、碳中和的途径包括减少碳排放和清除碳存量两个重要方面。减少碳排放的措施很多,主要包括减少能源(煤、油、气或煤电)消耗,开发绿色能源,及在生产过程中不使用高能耗或高CO<sub>2</sub>排放的材料,等等;而清除碳存量主要包括地质储存、植物吸收、人工合成含CO<sub>2</sub>材料等。

非金属矿产是矿产资源的重要类型之一。除“元素类非金属矿产”(曾称化工非金属矿产)外,“矿物类非金属矿产”“宝玉石类非金属矿产”“岩石类非金属矿产”和“黏土类非金属矿产”4类都可直接作为矿物原料或矿物材料加以利用,并且它们是由地球的自然(地质)作用合成或“加工”的。非金属矿产是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。非金属矿物材料是指从利用矿物和岩石本身的物理化学性质出发,对非金属矿产经适当的加工处理,而形成的在工业生产过程中使用和直接作为或制造物品所使用的一类材

料。显然,加工非金属矿物材料的原料主要来源于地球上大量存在的非金属矿产。

本文基于非金属矿产(物)的理化属性及非金属矿物材料的加工和使役过程对于节能降碳作用的功能属性,探讨非金属矿产(物)的自然产出属性、助熔属性及非金属矿产(物)和矿物材料的保温绝热属性、胶凝属性、催化与载体属性、应用代替属性及新型矿物材料研发对于非金属矿产(物)开发利用和非金属矿物材料生产与应用对于助力“双碳”战略实施的作用,并提出推进节能降碳非金属矿产(物)与非金属矿物材料开发中的关键问题。对推进非金属矿产与非金属矿物材料行业在双碳战略中发挥更大的作用具有一定的意义。

## 2 非金属矿产(物)及矿物材料的属性与节能降碳

### 2.1 非金属矿产(物)的自然产出属性与节能降碳

在自然界已知的 4 000 多种矿物和 700 种岩石中,已被用作非金属矿产开采的非金属矿物约 100 余种、岩石数十种<sup>[2-3]</sup>。我国《矿产资源法实施细则》(国务院令第 152 号)附件《矿产资源分类细则》中列出非金属矿产 92 种,2000 年原国土资源部发布第 8 号公告,将辉长岩、辉石岩、正长岩列为新发现矿种,使非金属矿产种属达到 95 种。

在石器时代古人就直接利用天然矿物或岩石作为工具、器具和装饰品等;在人类社会的发展早期所使用的各种材料都来自于矿物岩石和动植物;在近代工业化发展过程中,矿物岩石在冶金、机械铸造与加工、建筑建材和道路交通等领域发挥了重要作用;在现代工业、社会和科技发展过程中,电子信息、新能源、高速交通和航空航天等诸多尖端工业和国民经济各领域的发展,都离不开非金属矿产(物)和矿物材料<sup>[4]</sup>。

非金属矿产在地表浅处分布广,资源丰富,相对于金属矿产等可综合利用与循环利用率较高;相对于其他人工合成材料,加工生产能耗低、环境负荷小,符合低碳经济发展要求,对于人类可持续发展具有重要意义;在使用过程中一般不对环境产生危害,而且可广泛应用于节能降耗、环境保护等领域<sup>[5-6]</sup>;在退役后常常可再生或循环利用,并不对环境造成危害。已被发现的诸多非金属矿物中,尽管每种矿物都具有特殊的理化性能,但已被利用的矿物种类仅占少数,其中应用较多的只有 30~40 种。仍有很多矿物的新性能与新功

能尚未被认识和开发。随着科技发展的需要和矿物加工技术的发展,非金属矿产的深度开发和非金属矿物材料将会无机非金属材料领域中占有更加突出的地位,所具有的节能降碳功能将被进一步开发和利用,前景十分广阔。

很多非金属矿产(物)的利用具有显著的节能降碳作用。如温石棉,具有机械强度高、保温隔热、隔音吸声、防火阻燃等优异性能,是现代高温熔融(能耗大)条件下生产的纤维材料包括矿棉、玻璃纤维等无机纤维难以比拟的<sup>[7]</sup>;又如大理岩、花岗岩等经开采后生产的结构材料和饰面材料,相对于混凝土砌块和陶瓷砖等具有更高耐久性,在生产中更节能降耗与减少碳排放<sup>[8]</sup>;天然产出的沸石、硅藻土、膨润土、蛭石<sup>[9-11]</sup>、海泡石、坡缕石等具有良好的吸附性能,适当加工后可与离子交换树脂、活性炭等人工合成的吸附材料相媲美,但加工与使用过程中具有更节能和更低碳排放的优势<sup>[12]</sup>;许多非金属矿产(物)开采后经初步加工或无需加工即可作为不同材料使用,如砂石骨料、蛇纹岩和石灰岩助熔剂及石灰岩用作酸性废水处理剂等<sup>[13]</sup>;有些非金属矿产如石灰岩、白云岩等在形成过程中即可吸收并固定地壳或大气的 CO<sub>2</sub>,而蛇纹岩形成后可不断吸收大气中的 CO<sub>2</sub> 并转化为含镁碳酸盐<sup>[14]</sup>;等等。

借用非金属矿产(物)的自然产出过程中具有的储碳、固碳属性,在矿物材料制备与生产过程中也可将排放的 CO<sub>2</sub> 固定于矿物晶格中,实现降碳、储碳和固碳的目的。如采用蛇纹岩分离提取氧化镁制备碱式碳酸镁、采用工业副产石膏制备轻质碳酸钙并副产硫酸铵等,即可大量消耗 CO<sub>2</sub> 并使之进入矿物晶格中形成用途广泛的碳酸盐矿物粉体材料。

因此,非金属矿产(物)的“自然产出”这一属性即决定了它具有显著的节能降碳作用。

### 2.2 非金属矿产(物)及矿物材料的保温绝热属性与节能降碳

在工业设施和民用建筑中都涉及保温绝热材料。许多非金属矿产(物)本身或加工后具有优异的保温绝热性能,可用作保温材料<sup>[15]</sup>。如浮岩(石)、多孔玄武岩、硅藻岩等,为质轻的多孔状或蜂窝状岩石,可直接用作建筑墙体保温材料等;又如纤蛇纹石石棉、海泡石纤维和坡缕石纤维等纤维状矿物,可直接用作工业设施和建筑墙体的保温绝热材料;而工业蛭石<sup>[16]</sup>、珍

珠岩、页岩等经高温膨胀处理后可制备膨胀蛭石<sup>[17-19]</sup>、膨胀珍珠岩、膨胀页岩等,并进一步加工为保温板、管、砌块等保温绝热制品;具保温绝热属性的非金属矿产(物)或矿物材料是一类重要的无机保温绝热材料<sup>[20]</sup>,可广泛用作工业设施与民用建筑的保温绝热,达到节能降耗进而降碳的目的。

利用纤蛇纹石石棉、海泡石纤维、坡缕石纤维等可制成绒、纱、线、布、板、棉毡、管等并进一步加工为纤维保温材料制品或型材<sup>[21]</sup>;将多孔矿物材料如浮石、膨胀蛭石、膨胀珍珠岩、硅藻土及石膏等加工成多孔保温材料或型材<sup>[17]</sup>;通过发泡处理可制备泡沫石棉、发泡石膏、发泡膨胀珍珠岩及发泡膨胀蛭石等多孔发泡材料制品;通过复合处理可制备石棉硅藻土复合涂料、海泡石基复合硅酸盐保温材料、膨胀珍珠岩石棉保温胶泥或涂料等复合保温材料<sup>[22]</sup>或制品等。

保温材料具有导热率低(导热系数小于 $0.1163 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )、容重小、常疏松多孔及吸湿性差等共性<sup>[23]</sup>。非金属矿产(物)与矿物材料的热传导机制与金属材料不同。金属材料主要靠电子运动传递热量,而非金属矿产(物)与矿物材料通常为电介质,其热能的传输主要靠晶格振动。用作保温材料的非金属矿产(物)与矿物材料及制品,通常具有热导率低与多孔特征,因而常具有轻质、隔音吸音和阻燃防火功能等。

如膨胀蛭石(导热系数 $\leq 0.062 \sim 0.095 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )<sup>[17]</sup>、膨胀珍珠岩<sup>[22]</sup>(导热系数 $\leq 0.047 \sim 0.072 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )等所具有的细小隔层空间或空洞使其导热系数和松散密度均大大减小,并具有良好的保温、隔热、绝缘、阻燃等性能,同时化学性质稳定,并具有抗菌和耐候性能等。因此,膨胀蛭石和膨胀珍珠岩制品可广泛用作工业和民用保温绝热材料等,并满足工业工程保温节能中耐较高温度使用场景的要求,以及几乎所有民用建筑供暖设施的保温和耐久性要求等<sup>[24]</sup>。而绝大多数有机保温材料在价格、防火与耐久性等方面仍存在较大的局限性,难以满足相关要求。

非金属矿物保温材料与制品的生产温度多为常温,即使蛭石或珍珠岩膨胀加工的温度也低于或远低于 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[17]</sup>。而常用的其他无机非金属纤维材料,如矿棉、玻璃纤维、泡沫玻璃等,生产温度高达 $1200 \sim 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[25]</sup>。

因此,非金属矿产(物)及矿物材料的保温绝热属性与其他无机非金属保温材料相比,不仅在生产加工过程中具有突出的节能降耗作用,而且其保温制品在

工业和民用建筑中的广泛使用可大大减少工业和民用设施的能量耗散,进而达到节能和降碳的目的,对于助力碳减排和碳达峰具有重要的意义。

## 2.3 非金属矿产(物)的助熔属性与节能降碳

在工业热加工过程中助熔剂可降低物质的软化、熔化或液化温度点,具有加快反应过程并提高产出效率等作用<sup>[26]</sup>,达到节能降耗。包括以氧化钙、氧化镁为主要组分的碱性助熔剂,如玻璃陶瓷等用石灰岩、冶金用白云岩、蛇纹岩<sup>[27]</sup>等;以二氧化硅为主要组分的酸性助熔剂,如冶金用石英岩、玻璃和陶瓷用长石、霞石等<sup>[28]</sup>;以卤化物、氧化铝为主要组分的中性助熔剂,如冶金、化工用萤石<sup>[29]</sup>、石盐等。它们分别适用于不同的热加工组分体系,加入这些非金属矿产(物)对体系具有助熔的作用,可降低生产温度并节能降耗。

长石在陶瓷、玻璃行业是重要的工业配方组分和助熔剂原料<sup>[30]</sup>。长石的熔点、熔融间隔、熔体的黏度等性质具有重要的应用意义,钾长石、钠长石、钙长石的熔点分别为 $1290$ 、 $1215$ 、 $1552 \text{ }^\circ\text{C}$ ,由于长石中常存在类质同象替代,故熔点是变化的。长石混合物的熔点较单一成分的长石熔点低,如 $30\%$ 钾长石与 $70\%$ 钠长石,或 $30\%$ 钾长石和 $60\%$ 钠长石及 $10\%$ 钙长石混合,其熔点约为 $1190 \text{ }^\circ\text{C}$ 。长石含有碱金属和碱土金属,可以使多相的硅酸盐混熔系统的熔点大大降低,如纯高岭石的熔点为 $1770 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,纯石英的熔点在 $1713 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,如果在 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系统加入长石,则在 $985 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 即开始出现液相,而且长石的含量越多熔融温度越低。又如蛇纹岩富含氧化镁<sup>[27]</sup>,是优质的碱性炼铁熔剂配料,同时可使烧结矿具有较好的结构特征和机械强度,不仅具有造渣剂的作用,而且可明显改善炉渣流动性。

因此,这类非金属矿产(物)的助熔属性决定了它们具有显著的节能降碳作用。用作助熔剂的非金属矿产(物)还有硅灰石、透辉石、透闪石、芒硝、玄武岩、碱性花岗岩、珍珠岩等,许多还需进一步研究和开发。

## 2.4 非金属矿物材料的胶凝属性与节能降碳

水泥是我国经济建设中使用量最大的胶凝材料。我国水泥年产量多年位居世界首位,为经济建设与腾飞做出了不可磨灭的贡献。然而,水泥的生产温度高达 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ ,所使用的石灰原料在生产中分解并释放 $\text{CO}_2$ 气体,粗略计算每生产 $1 \text{ t}$ 水泥熟料约排放 $1 \text{ t CO}_2$

气体。在节能降碳方面,从 2017 年到 2020 年的 3 年间,我国水泥行业节能先进企业的可比熟料综合能耗平均值已从 103.3 kgce/t 下降到 95.5 kgce/t;2020 年,70% 水泥企业的熟料综合能耗值均低于 115 kgce/t<sup>[31]</sup>。在“碳达峰、碳中和”的时代要求面前,胶凝材料行业如何适应“双碳”工作大局,仍面临诸多挑战。

在非金属矿物胶凝材料方面常见的有熟石膏、石灰、菱苦土等,相对于水泥的生产具有突出的节能降碳作用。如采用天然石膏或符合要求的工业副产石膏生产熟石膏胶凝材料,生产温度可低于 350 ℃,且原料在生产过程中不释放 CO<sub>2</sub> 气体;熟石膏可代替水泥用于制备轻型砌块和墙体、墙面抹灰、装饰装修板材等方面,高强石膏胶凝材料则具有更优异的胶凝性能,在代替水泥用作胶凝材料时具有更广泛的用途<sup>[32]</sup>;而采用石灰石(岩)等生产石灰的温度在 1 000 ℃ 左右,远低于水泥熟料的生产温度,不仅可代替水泥,而且可与经过高温过程的工业固废或火山灰类物质经配方后形成碱激发胶凝材料,与传统水泥相比,强度高,水化热低,具有抗冻、快硬、抗腐蚀及耐久等优良性能,可广泛用作工业固废堆场固化稳定、采矿孔回填、高速公路基层或底基层处理及河(湖、海)的挡水堤坝等与建筑砌块、墙体等建筑材料的胶凝材料<sup>[33]</sup>;菱镁矿或白云石经 800 ~ 850 ℃ 温度下煅烧后可制成菱苦土或白云石灰,与氯化镁、硫酸镁等盐类溶液拌和后制成氯氧镁水泥,对有机物无腐蚀性,配以竹筋、苇筋和无机纤维或轻质骨料制成混凝土,具有较好的抗裂性能,也可用作地板材料、家具板材和墙体材料等<sup>[34]</sup>。为克服氯氧镁水泥易泛霜和性能下降的不足,通过外加剂改性已取得重要进展。

胶凝材料在工业及民用建筑工程中用量很大,而水泥在生产过程中的能耗和 CO<sub>2</sub> 排放量都很大,非金属矿物胶凝材料在许多应用场景中可代替水泥,加大推广和应用对于节能降碳具有重要的作用。

## 2.5 非金属矿产(物)的催化和载体属性与节能降碳

非金属矿产(物)因具有阳离子交换性、多孔性、表面积大和表面化学断键不饱和等属性而在工业生产过程中被用作催化材料,包括化学催化和光化学催化剂或载体,以加快反应过程、提高产品的纯度或产出效率等,并达到节能降耗和降碳的目的<sup>[35]</sup>。如高岭土、沸石、活性白土等用作催化剂及载体等;部分具有半导

体性能的矿物具有优异的光催化性能,不仅具有光催化降解有机废物和抗菌作用,而且在太阳能作用下通过光催化可将水、CO<sub>2</sub> 转化为氢、甲烷等燃料<sup>[36-37]</sup>。

化学催化使用的催化剂在反应物发生作用过程中可以改变化学反应的速率,而自身不出现在产物中。活性组分可以是单一物质,也可以是多种物质构成。矿物催化剂是一种本身就具备吸附性的物质,同时具有一定的催化活性作用,可在高温和高酸碱环境中使用,通常作为催化剂载体。常见的有高岭土、膨润土、硅藻土、沸石、凹凸棒石与海泡石等及其改性活化产物,如酸活化高岭土、活性白土、4A 或 5A 沸石等<sup>[38-41]</sup>。

光催化技术是一项可以利用太阳光能来进行清洁能源生产、环境污染治理和二氧化碳转化的新技术,在氢能生产、空气净化、污水处理、国防军事、医疗卫生、建材、电力、化工等众多领域具有广阔的前景。如在光催化制氢方面可利用太阳能将水转化为氢气和氧气;在光催化合成方面可将二氧化碳转化为甲烷、甲醇等燃料;这两种技术的产业化应用,都可大大减少能源矿产的利用,进而减少二氧化碳的排放,在解决全球性能源短缺和二氧化碳减排等重大问题方面具有广阔的应用前景<sup>[42]</sup>。

天然产出的锐钛矿、金红石、水钠锰矿、赤铁矿、针铁矿等都具有一定的光催化能力,而蒙脱石、硅藻土、高岭土、云母粉、天然浮石和膨胀珍珠岩等具有表面积大、吸附性强、疏松多孔及耐高温、耐酸碱等优良性能,常被用作光催化剂的载体。以金红石作为光催化材料处理含偶氮染料废水既有吸附作用又具有光催化降解作用<sup>[43]</sup>,将锐钛矿型 TiO<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、钙钛矿等纳米光催化活性粒子负载于蒙脱石<sup>[44-45]</sup>、硅藻土<sup>[46-47]</sup>、云母粉<sup>[48-49]</sup>等表面上,不仅增加活性组分分散性和比表面积,进而提高光催化效率,而且在工业废水处理过程中也便于复合光催化剂的回收和重复利用。

广泛分布于地球陆地最顶层的“矿物膜”,被认为是地球的第四大圈层,是天然的光电转化系统。富含水钠锰矿、赤铁矿、针铁矿、锐钛矿、金红石等半导体矿物,具有良好的日光响应能力,光电转换性能稳定、灵敏且长效<sup>[50]</sup>,在日光辐射下将太阳能转化为矿物光子能量,不仅可以光催化裂解水产生氧气和氢气,而且可促进大气和水体中的二氧化碳转化为碳酸盐矿物<sup>[51]</sup>。可见,自然界中广泛存在具有半导体性能的矿物,一直起着光催化剂的作用。这不仅说明地球表层

广泛分布的非金属矿物对于储碳降碳的作用,而且也作为开发新型光催化矿物材料提供了方向。

## 2.6 非金属矿物材料的应用代替属性及新型矿物材料研发与节能降碳

非金属矿物材料可广泛替代人工合成材料,这种应用替代属性具有明显的节能降碳作用。非金属矿产(物)通过深度加工制备的功能性矿物材料,可广泛代替包括大多数高能耗工艺生产的无机或有机材料,采用天然矿物材料比人工合成材料具有更好的节能降耗优势。如天然石墨材料代替人工合成的石墨材料,方解石和白色大理岩超细加工的重质碳酸钙粉代替煅烧、消化、合成的轻质碳酸钙粉,黏土矿物和沸石矿物吸附材料代替活性炭、合成沸石,天然矿物纤维、晶片代替高温熔融制备的玻璃纤维、矿棉纤维和玻璃鳞片及合成有机纤维等,绢云母岩的超细粉(含云母和石英)作为橡胶增强填料代替白炭黑,等等。

新型矿物材料的研发对于节能降碳具有重要的意义。高纯石英涉及电子信息和新能源光伏发电领域中的石英坩埚、单晶硅、芯片、光导纤维及尖端光学材料的制备。光伏发电是推动电力能源向低碳转型的重要途径。据统计,我国2012—2020年光伏装机总量从624.8万kW增长到25317.0万kW。现有光伏装机的年均碳减排效益约为2.0亿t,到2030年累计可以达到19.2亿t,对碳达峰、碳中和目标的落实具有重要推动作用<sup>[52]</sup>。我国的光伏产业链也位于世界领先水平,在全球前十的光伏硅晶制造企业中,有7家是中国企业,同时光伏产业链的技术和完整程度也远高于其他国家<sup>[53]</sup>。石墨具有耐高温性、导电导热性、润滑性、化学稳定性、可塑性、抗热震性、抗辐射性和中子减速等优异性能,高纯石墨材料涉及核石墨、超低温固体润滑剂、电子材料、航空航天(导电、散热、轻质、高强石墨)等高端装备制造及高储能和新能源材料(超级电容器和电池材料)等高技术领域<sup>[54-55]</sup>。石墨烯具有独特的二维结构、较大的理论比表面积、高载流子迁移率、高杨氏模量以及高热导率等特性,一直以来被视为新能源转换与存储领域的潜在应用材料<sup>[56]</sup>。石墨烯作为涂层可以加强锂离子氧化电极和石墨烯-硅复合电极,石墨烯应用到超级电容器能够部分替代或者全部替代活性炭材料,基于石墨烯复合材料的超级电容器可以提高电力系统运行效率,同时在燃料电池、储氢介质等装置中也是优良的电催化剂材料,并可应用于

不同类型的太阳能电池中<sup>[57-58]</sup>。高纯石英、石墨及石墨烯与光伏发电、新型电池或超级电容器储能材料相结合具有重要的节能降碳和资源与环境保护意义。此外,如锐钛矿、金红石光催化性能和光-电转换性能,电气石的热-电转换性能,钙钛矿结构矿物和石英的机-电转换性能等等,具有优异导电性能的石墨、绝缘性能的白云母、耐火的金云母等,以及比表面积大、阳离子交换容量高、吸附性强的蒙脱石、坡缕石、海泡石黏土矿物等等,基于节能、降耗、降碳的目的具有开发诸多新型矿物材料的潜力。

基于矿物的功能属性,许多矿物可以被开发为用途广泛的新型矿物材料,并代替人工合成材料。在自然界已知的4000多种矿物和700种岩石中,每种矿物或岩石都有不同和特殊的理化性能,为工业开发提供了丰富多样的应用技术性能,通过深度加工可生产产品繁多的非金属矿材料,可为国民经济众多领域包括基础材料工业、环境保护业、新兴信息产业、高端装备制造和新材料等新兴产业的节能降碳提供坚实的技术支撑。

## 3 节能降碳非金属矿(物)与非金属矿物材料开发中的关键问题

非金属矿(物)与非金属矿物材料对于实现“双碳”目标具有重大和深远的战略意义,在开发研究和生产应用过程中应基于节能降碳的理念,充分关注如下关键问题。

(1)当前,在非金属矿(物)与非金属矿物材料的节能降耗利用方面做了大量的工作,在非金属矿产(物)开发、节能降耗、深度加工与新型矿物材料研发与推广应用等方面取得突出的成效,但对于在双碳战略指导下,如何形成非金属矿(物)与非金属矿物材料自身的理论和技术原理体系,并在相应的理论和关键技术原理体系的指导下进行系统的工业应用和示范,应加快规划与实施。

(2)非金属矿物材料是基于非金属矿产(包括矿物或岩石)的理化性能属性的不同而进行加工和应用的,包括矿物(或岩石)的可膨胀性、保温绝热性、助熔性、比表面积大、多孔性、催化性、加热分解与水化反应性及光-电转化性等,具体如石英岩的可高纯化加工性、鳞片石墨的可石墨烯化剥离分散性,等等。因此,基于非金属矿物化属性和深度加工关键技术的非金属矿产找矿评价规范的制定就显得十分重要。

(3) 非金属矿产(物)的深度加工技术不仅可实现非金属矿物材料的巨大增值,而且可实现新材料制备的重大突破。如石英岩制备高纯石英材料技术仍是“卡脖子技术”,目前超高纯石英砂国际市场仍被美国 Unimin 公司所垄断;石墨分散剥离制备石墨烯技术则开创了石墨材料制备与应用的新领域;在非金属材料(物)与矿物材料研究、开发和生产及应用过程中,要加强非金属矿物膨胀、绝热、助熔、催化、胶凝、能量转化及储碳固碳机理的研究,并基于非金属矿物的理化属性和可加工属性加强矿物材料高纯化、纳米化、多孔化、有机化、功能化和高技术化等深度加工技术研究。

(4) 在非金属材料保温绝热材料、助熔材料、胶凝材料、催化剂与载体材料及新型能源矿物材料方面进行重点规划,突破高膨胀率膨胀蛭石、膨胀珍珠岩、膨胀页岩膨胀机理与绝热矿物材料加工关键技术,蛇纹石(岩)、长石、霞石、萤石、白云石等矿物的助熔机理与助熔剂配制关键技术,高强石膏胶凝材料强度形成机制与制备关键技术,比表面积大、多孔矿物(酸化高岭土、活性白土、沸石、硅藻土、坡缕石等)及光-电转换矿物(钙钛矿、锐钛矿、金红石、水钠锰矿等)用作催化剂和光催化剂及载体的催化与光-电转化机理与加工关键技术,非金属矿物储碳固碳矿物材料制备关键技术与固碳机制,新型能源材料领域用高纯石英、高纯石墨等高纯化关键技术,等等。

## 4 结语

非金属矿产(物)是自然界产出(即天然合成加工)的有用矿物原料,经采选与深度加工后可成为应用广泛的非金属矿物材料,相对于金属、能源、化工和水泥、玻璃、陶瓷等工业生产的材料,具有显著的节能降耗降碳、环境保护和生态可持续效益。

非金属矿产(物)具有自然产出的属性,所加工形成的矿物材料相对于其他无机和有机材料的制备与加工过程具有明显的节能降碳作用;非金属矿产(物)及矿物材料的保温绝热属性、助熔属性、胶凝属性、催化与载体属性、应用代替属性及工程应用或直接实现碳减排或助力碳减排;非金属矿产(物)对 CO<sub>2</sub> 的吸收则具有碳储存的作用。因此,非金属矿(物)与非金属材料在节能降碳技术领域具有重要的作用。

“双碳”目标下我国非金属矿(物)与非金属材料的研究开发和生产应用,要建立起自身的理论和技术原理体系,瞄准非金属矿产(物)显著的节能降碳

理化属性,不仅在找矿评价技术与规范方面加以重视和完善,而且在基于非金属矿物理化属性的节能降碳机理、深度加工技术及在非金属材料保温绝热材料、助熔材料、胶凝材料、催化剂与载体材料及新型能源矿物材料开发应用方面进行重点规划,为实现“双碳”目标作出应有的贡献。

## 参考文献:

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. [https://www.ccps.gov.cn/xxsxk/zy/202009/t20200922\\_143558.shtml](https://www.ccps.gov.cn/xxsxk/zy/202009/t20200922_143558.shtml).  
XI J P. Full text of Xi's statement at the general debate of the 75th session of the united nations general assembly [EB/OL]. [https://www.ccps.gov.cn/xxsxk/zy/202009/t20200922\\_143558.shtml](https://www.ccps.gov.cn/xxsxk/zy/202009/t20200922_143558.shtml).
- [2] 田煦,周开灿,文化川. 非金属矿产地质学[M]. 武汉:武汉工业大学出版社,1989.  
TIAN X, ZHOU K C, WEN H C. Geology of nonmetallic minerals[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1989.
- [3] 胡兆扬,于延棠,徐立铨. 非金属矿工业手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1992.  
HU Z Y, YU Y T, XU L Q. Nonmetallic minerals industry handbook [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992.
- [4] 吕国诚,廖立兵,李雨鑫,等. 快速发展的我国矿物材料研究——十年进展(2011—2020年)[J]. 矿物岩石地球化学通报,2020,39(4):714-725.  
LV G C, LIAO L B, LI Y X, et al. Rapid development of the mineral materials research in China ——progress in the past decade (2011—2020)[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2020, 39(4): 714 - 725.
- [5] 塔桂欣. 非金属矿物材料在无机保温材料中的应用[J]. 建筑技术开发,2020,47(18):146-147.  
TA G X. Application of non-metallic mineral materials in inorganic thermal insulation materials [J]. Building Technique Development, 2020, 47(18): 146 - 147.
- [6] 张旭,章国权,炳炳飞. 天然多孔矿物材料在土壤改良和土壤环境修复中的应用及研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2020(4):223-230.  
ZHANG X, ZHANG G Q, YANG B F. Application and research progress of natural porous mineral materials in soil improvement and soil environmental rehabilitation[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2020(4): 223 - 230.
- [7] 吴春香,宋鹏程,孙红娟,等. 温石棉及尾矿资源化利用研究进展[J]. 中国非金属矿工业导刊,2014(4):6-9.  
WC C X, SONG P C, SUN H J, et al. Research progress on resource utilization of chrysotile and tailings[J]. China Non-metallic Mining Industry, 2014(4): 6 - 9.
- [8] 张文强,高言,刘高峰. 中南半岛饰面大理石的主要特征及资源潜力探讨[J]. 中国非金属矿工业导刊,2021(5):60-64.  
ZHANG W Q, GAO Y, LIU G F. Discussion on main characteristics and

- resource potential of veneer marble in indochina peninsula[J]. China Non-metallic Mining Industry, 2021(5): 60-64.
- [9] FREITAS E, ALMEIDA H, VIEIRA M. Binary adsorption of zinc and copper on expanded vermiculite using a fixed bed column[J]. Applied Clay Science, 2017, 146: 503-509.
- [10] STAWINSKI W, WEGRZYŃ A, MORDARSKI G, et al. Sustainable adsorbents formed from by-product of acid activation of vermiculite and leached-vermiculite-LDH hybrids for removal of industrial dyes and metal cations[J]. Applied Clay Science, 2018, 161: 6-14.
- [11] 彭同江,孙红娟,孙金梅,等. 金云母-蛭石间层矿物阳离子交换容量的影响因素研究[J]. 矿物岩石, 2009, 29(1): 14-19.
- PENG T J, SUN H J, SUN J M, et al. Research on the affecting factors of cation exchanging capacity of phlogopite-vermiculite interstratified mineral[J]. Journal of mineralogy and petrology, 2009, 29(1): 14-19.
- [12] 王力,主曦曦. 矿物基多孔材料的制备及其吸附研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(5): 48-51.
- WANG L, ZHU X X. Review on preparation and adsorption of mineral-based porous material[J]. Materials Review, 2013, 27(5): 48-51.
- [13] 寇明月,刘文静,傅玲子,等. 典型矿物材料对水中磷吸附性能的比较研究[J]. 当代化工, 2020, 49(7): 1347-1355.
- KOU M Y, LIU W J, FU L Z, et al. Comparative study on the adsorption properties of typical mineral materials for phosphorus in water[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(7): 1347-1355.
- [14] KONG M, LEE Y. Carbonation of chrysotile under subduction conditions[J]. Engineering, 2019(5): 490-497.
- [15] 张红林,王翠翠,杨辉,等. 非金属矿物材料在无机保温材料中的应用及进展[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2019(4): 7-9.
- ZHANG H L, WANG C C, YANG H, et al. Application and progress of non-metallic materials in inorganic insulation materials[J]. China Non-metallic Mining Industry, 2019(4): 7-9.
- [16] RASHAD, ALAA M. Vermiculite as a construction material - A short guide for civil engineer[J]. Construction & Building Materials, 2016, 125: 53-62.
- [17] 彭同江,孙红娟,罗利明,等. 工业蛭石的矿物学属性及在“双碳”战略中的作用[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 1-8.
- PENG T J, SUN H J, LUO L M, et al. The mineralogical properties of industrial vermiculite and its role in the strategy of saving energy and reducing CO<sub>2</sub> emission[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(6): 1-8.
- [18] 刘福生,彭同江,张宝述. 膨胀蛭石的利用及其新进展[J]. 非金属矿, 2001, 24(4): 5-7.
- LIU F S, PENG T J, ZHANG B S. Utilization of expanded vermiculite and its new progression[J]. Non-Metallic Mines, 2001, 24(4): 5-7.
- [19] 解颜岩,孙红娟,彭同江,等. 膨胀蛭石的化学-微波法制备及其膨胀率与柔韧性的关系[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1325-1332.
- XIE Y Y, SUN H J, PENG T J, et al. Preparation of expanded vermiculite via chemical-microwave method and correlation between expansion rate and flexibility[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(8): 1325-1332.
- [20] 徐帅,周张健,张笑歌,等. 新型无机保温材料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(5): 1302-1306.
- XU S, ZHOU Z J, ZHANG X G, et al. Research progress of new inorganic insulation materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(5): 1302-1306.
- [21] 唐芳,刘阳平,黄建华. 传统保温材料与新型保温材料对比及选用原则[J]. 应用能源技术, 2018(11): 6-9.
- TANG F, LIU Y P, HUANG J H. Comparison and selection principles of traditional thermal insulation materials and new thermal insulation materials[J]. Applied Energy Technology, 2018(11): 6-9.
- [22] 胡素芳,陈代璋. 新型膨胀珍珠岩保温材料的研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2000(1): 17-18.
- HU S F, CHEN D Z. Research on new expanded perlite thermal insulation material[J]. China Non-Metallic Mining Industry Herald, 2000(1): 17-18.
- [23] 孙志坚,孙玮,傅加林,等. 国内绝热保温材料现状及发展趋势[J]. 能源工程, 2001(4): 26-28.
- SUN Z J, SUN W, FU J L, et al. Current status and development of thermal insulating materials in China[J]. Energy Engineering, 2001(4): 26-28.
- [24] 习永广,彭同江. 膨胀蛭石/石膏复合保温材料的制备与表征[J]. 复合材料学报, 2011, 28(5): 156-161.
- XI Y G, PENG T J. Preparation and characterization of expanded vermiculite/gypsum thermal insulation composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(5): 156-161.
- [25] 王皓,马志斌,廖洪强,等. 高温下多种工业固体废弃物复配体系的熔融特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(1): 296-300.
- WANG H, MA Z B, LIAO H Q, et al. Melting characteristics of complex of different types of industrial solid waste at high temperature[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(1): 296-300.
- [26] 陆宏权,李寒旭,马飞,等. 钙基助熔剂对煤灰熔融性影响及熔融机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(2): 111-114.
- LU H Q, LI H X, MA F, et al. Study on fly ash fusibility affected by calcium base flux and fusion mechanism[J]. Coal Science And Technology, 2011, 39(2): 111-114.
- [27] 邱兰清. 国外蛇纹石粉矿的开发利用[J]. 化工矿山技术, 1991, 20(4): 57-58.
- QIU L Q. Development and utilization of serpentine powder ore abroad[J]. Journal of Chemical Mining Technology, 1991, 20(4): 57-58.
- [28] 李银. 助熔剂对磷矿碳热还原反应的工艺及机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- LI Y. Study on the process and mechanism of the carbothermal reduction of phosphate rock by flux[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [29] 李敬,张寿庭,商朋强,等. 萤石资源现状及战略性价值分析[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(6): 62-68.

- LI J, ZHANG S T, SHANG P Q, et al. Present situation and analysis of strategic value of fluorite resource[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(6): 62–68.
- [30] 耿锐仙, 夏举佩, 杨劲, 等. 钾长石助熔磷矿石碳热反应热力学分析与评价[J]. 化学工程, 2017, 45(8): 54–59.
- GENG L X, XIA J P, YANG J, et al. Thermodynamic analysis and evaluation of thermal reaction of phosphate ore with K–feldspar fluxing[J]. Chemical Engineering, 2017, 45(8): 54–59.
- [31] 谢国俊. 多措并举全力做好水泥行业节能降碳工作[J]. 中国水泥, 2022(4): 49–52.
- XIE G J. Take multiple measures to do a good job in energy saving and carbon reduction in the cement industry[J]. China Cement, 2022(4): 49–52.
- [32] 崔建勤, 周应庆, 梁保靖, 等. 大宗资源化利用脱硫石膏生产高强度高精度砌块的实践[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(4): 90–93.
- CUI J Q, ZHOU Y Q, LIANG B J, et al. The practice of using desulfurized gypsum to produce high–strength and high–precision blocks as bulk resources utilization[J]. New Building Materials, 2022, 49(4): 90–93.
- [33] 丁德文. 石灰生产工艺创新与应用[J]. 中国氯碱, 2022(6): 44–47.
- DING D W. Innovation and application of lime production technology[J]. China Chlor–Alkali, 2022(6): 44–47.
- [34] 王少阳, 祁欣, 罗旭东, 等. 白云石的应用进展[J]. 耐火材料, 2022, 56(1): 88–92.
- WANG S Y, QI X, LUO X D, et al. Application progress of dolomite[J]. Refractories, 2022, 56(1): 88–92.
- [35] 张鹏. 黏土矿物基催化剂的界面设计与催化性能调控[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- ZHANG P. Study on interface of clay–based catalysts and regulation of catalytic performance[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [36] 尹成彬, 方继敏. 新型环境材料水钠锰矿应用研究进展[J]. 云南化工, 2020, 47(2): 15–16.
- YIN C B, FANG J M. Research progress on application of new environmental materials in birnessite[J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(2): 15–16.
- [37] 藜滢. 人工/天然催化材料非均相活化  $H_2O_2$  的合理设计与评估: 用于有机污染修复[D]. 上海: 华东理工大学, 2020.
- QIN Y. Design and process evaluation of heterogeneous activation of  $H_2O_2$  by artificial/natural catalytic materials: for organic pollution remediation[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.
- [38] 王炫, 陈俊涛, 陆银平, 等. 改性高岭土基非均相 Fenton 催化剂降解罗丹明 B 染料废水的研究[J]. 化工新型材料, 2018, 46(11): 208–211.
- WANG X, CHEN J T, LU Y P, et al. Research of modified kaolin based heterogeneous Fenton catalyst degrading rhodamine B dye in wastewater[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(11): 208–211.
- [39] 何璐红. 蒙皂族黏土材料在催化中的应用述评[J]. 盐科学与化工, 2018, 47(5): 4–7.
- HE L H. Application review of smectite clay in catalysis[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2018, 47(5): 4–7.
- [40] 刘姗姗. 高岭土基固体酸催化剂的研制及应用[D]. 郑州: 河南大学, 2016.
- LIU S S. Preparation and application of Kaolin–based solid acid catalyst[D]. Zhengzhou: Henan University, 2016.
- [41] 何磊, 么秋香, 孙鸣, 等. 二维(2D)沸石与三维(3D)沸石的制备及催化研究进展[J]. 化学学报, 2022, 80(2): 180–198.
- HE L, ME Q X, SUN M, et al. Progress in preparation and catalysis of two–dimensional(2D) and three–dimensional(3D) zeolites[J]. Acta Chimica Sinica, 2022, 80(2): 180–198.
- [42] 发展研究编辑部. 光催化助力“双碳”目标多领域赋能清洁生活—专访中国工程院院士、福建省人民政府顾问、福州大学校长付贤智[J]. 发展研究, 2022, 39(5): 1–6.
- Editorial office of development studies. Photocatalysis helps the "dual–carbon" target to empower clean life in multiple fields – an exclusive interview with Fu Xianzhi, academicien of the Chinese Academy of Engineering, advisor to the Fujian Provincial People's Government, and president of Fuzhou University[J]. Development Research, 2022, 39(5): 1–6.
- [43] 王程. 光催化活性环境矿物材料的制备及应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- WANG C. Study on the preparation and application of photocatalytic active environmental mineral materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [44] 吕霞, 彭同江, 孙红娟, 等.  $TiO_2$ /蒙脱石复合物中纳米  $TiO_2$  的相变与光催化性能[J]. 人工晶体学报, 2013, 42: 290–298.
- LV X, PENG T J, SUN H J, et al. Phase transition and photocatalytic properties of  $TiO_2$  in  $TiO_2$ /montmorillonite nano–composite[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42: 290–298.
- [45] 肖青, 孙红娟, 彭同江, 等. 石墨相氮化碳/蒙脱石复合材料的制备及其可见光催化性能[J]. 合成化学, 2020, 28(2): 91–98.
- XIAO Q, SUN H J, PENG T J, et al. Preparation and visible photocatalytic properties of g– $C_3N_4$ /montmorillonite composites[J]. Chinese Journal of Synthetic Chemistry, 2020, 28(2): 91–98.
- [46] 孙志明, 张欣超, 狄永浩, 等. 多孔矿物复合催化材料研究进展与发展趋势[J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(12): 42–48.
- SUN Z M, ZHANG X C, DI Y H, et al. Research progress and development trend of porous minerals–bearing composite catalysis materials[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(12): 42–48.
- [47] 肖力光, 张晓彤, 闫刚, 等. 硅藻土/ $TiO_2$ /氧化石墨烯复合材料的制备及其光催化性能研究[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(4): 712–717.
- XIAO L G, ZHANG X T, YAN G, et al. Preparation and the photocatalytic properties of diatomite/ $TiO_2$ /graphene oxide composite materials[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(4): 712–717.
- [48] 李瑶, 彭同江, 孙红娟, 等.  $Cu–TiO_2$ /白云母纳米复合材料的制备及结构、形貌和光催化性能[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(4): 480–485.



- LI Y, PENG T J, SUN H J, et al. Photocatalytic properties of Cu - TiO<sub>2</sub>/muscovite nanocomposites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(4): 480 - 485.
- [49] 曾鹏,彭同江,孙红娟,等. LaNi<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>O<sub>3</sub> 钙钛矿型氧化物的制备与光催化降解性能[J]. 合成化学, 2021, 21(5): 368 - 374.
- ZENG L, PENG T J, SUN H J, et al. Preparation and photocatalytic degradation performance of LaNi<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>O<sub>3</sub> perovskite oxide [J]. Chinese Journal of Synthetic Chemistry, 2021, 21(5): 368 - 374.
- [50] 鲁安怀,王长秋,李艳. 环境矿物学研究进展(2011—2020年)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(5): 881 - 898.
- LU A H, WANG C Q, LI Y. Research progress of environmental mineralogy (2011—2020) [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2020, 39(5): 881 - 898.
- [51] 鲁安怀,李艳,丁竑端,等. 天然矿物光电效应: 矿物非经典光合作用[J]. 地学前缘, 2020, 27(5): 179 - 194.
- LU A H, LI Y, DING H R, et al. Natural mineral photoelectric effect: non - classical mineral photosynthesis [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(5): 179 - 194.
- [52] 韩梦瑶,熊焦,刘卫东. 中国光伏发电的时空分布,竞争格局及减排效益[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1338 - 1351.
- HAN M Y, XIONG J, LIU W D. Spatio - temporal distribution, competitive development and emission reduction of China's photovoltaic power generation [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1338 - 1351.
- [53] 王明菊,王辉. 太阳能光伏发电技术现状与发展探讨[J]. 能源与节能, 2021, 7: 37 - 38.
- WANG M J, WANG H. Discussion on status and development of solar photovoltaic power generation technology [J]. Energy and Conservation, 2021, 7: 37 - 38.
- [54] ZHANG H, YANG Y, REN D, et al. Graphite as anode materials: fundamental mechanism, recent progress and advances [J]. Energy Storage Materials, 2021, 36: 147 - 170.
- [55] CHUNG D. Review graphite [J]. Journal of materials science, 2002, 37(8): 1475 - 1489.
- [56] OLABI A G, ABDELKAREEM M A, WILBERFORCE T, et al. Application of graphene in energy storage device - a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110026.
- [57] 孔玥,黄燕山,罗宇,等. 石墨烯基复合材料在新能源转换与存储领域的应用现状,关键问题及展望[J]. 化工进展, 2021, 40(9): 5118 - 5131.
- KONG Y, HUANG Y S, LUO Y, et al. Application status, key issues and prospects of graphene - based composite materials in the field of new energy conversion and storage industry [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(9): 5118 - 5131.
- [58] 叶琳,苏睿婷. 石墨烯在能源存储装置中的应用和发展[J]. 工业技术创新, 2020, 7(1): 97 - 102.
- YE L, SU R T. Application and development of graphene in energy storage device [J]. Industrial Technology Innovation, 2020, 7(1): 97 - 102.